

JEOTERMAL REZERVUARLARIN MODELLENMESİ

Abdurrahman SATMAN
Mustafa ONUR
Hülya SARAK

ÖZET

Literatürde jeotermal rezervuar davranışlarını modelleyen çeşitli modeller mevcuttur. Bunlar *üretim debisi azalma yöntemi*, *boyutsuz rezervuar modellemesi yöntemi* ve *3 boyutlu sayısal modelleme yöntemi* olarak üç ana başlık altında toplanabilir. Yeni bulunan sahalarda elde yeterli miktarda veri bulunmamaktadır. Bu nedenle, sahanın işletilmeye başlandığı erken dönemlerde rezervuarın basınç davranışının modellenmesi ve jeotermal potansiyelin tahmin edilebilmesi için kullanılacak en uygun yöntem boyutsuz rezervuar yöntemidir.

Bu çalışmada, jeotermal rezervuarın üretim davranışının boyutsuz rezervuar modellemesi yöntemi ile modellenmesi konusu tartışılmaktadır. İncelenen modellerde üretim, enjeksiyon ve doğal beslenmenin, düşük sıcaklıklı ve sıvının etken olduğu bir jeotermal rezervuarın mevsimsel basınç veya su seviyesi üzerindeki etkileri göz önüne alınmaktadır. Modellemede rezervuar ve akifer ayrı ayrı tanklar olarak temsil edilmekte ve beslenme kaynağının etkisi incelenmektedir.

Model sonuçları sabit debide üretim/enjeksiyon durumunda analitik ifadeler şeklinde verilmekte, debi değişimleri Duhamel İlkesi yaklaşımıyla modellenmektedir. Optimizasyon yöntemi kullanılarak, ölçülen saha verileri model sonuçlarıyla karşılaştırılarak rezervuar ve akifere ait parametreler belirlenebilmektedir. Modellerin sonuçları grafiksel olarak verilmekte ve önemli gözlemler vurgulanmaktadır.

İzlanda'daki üç jeotermal sahanın yanısıra Yeni Zelanda'daki bir jeotermal sahanın verileri ve ayrıca Türkiye'den Kızıldere jeotermal sahası verileri değerlendirilerek, model sonuçlarıyla saha sonuçları karşılaştırılmakta ve sonuçlar sunulmaktadır.

1. GİRİŞ

Sıcaklığına bağlı olarak, başta konut ısıtması olmak üzere elektrik üretimi, sera ısıtması, termal turizm-tedavi ve endüstri gibi birçok alanda kullanılan jeotermal enerji açısından ülkemiz, dünyanın zengin ülkelerinden birisidir. Türkiye'de ısıtma amaçlı olarak jeotermal enerjinin kullanıldığı bölgeler arasında Balçova, Afyon, Kırşehir, Simav, Gönen ve Kızılcahamam sayılabilir. Sıcak jeotermal akışkan soğuk kış dönemlerinde rezervuardan üretilerek konutların ısıtılması sağlanmaktadır.

Soğuk kış döneminde rezervuardan yapılan akışkan üretime bağlı olarak rezervuar basıncı ve su seviyesi düşmekte, sıcak dönemde üretimin azaltılması veya durdurulması durumunda ise, doğal beslenmenin etkisiyle, rezervuar basıncı ve su seviyesi tekrar yükselmektedir. Rezervuardan üretilen miktarın beslenmeyle karşılanması durumunda jeotermal sistem yenilenebilir bir sistem olarak çalışmaktadır. Karşılanmaması durumunda ise tükenbilir jeotermal sistem gündeme gelir.

Jeotermal rezervuar modellemesinin başlıca amacı, uzun dönem jeotermal rezervuar potansiyelinin doğru ve gerçekçi olarak tahmin edilmesidir. Bu amaçla geliştirilmiş olan modeller [1-8] literatürde

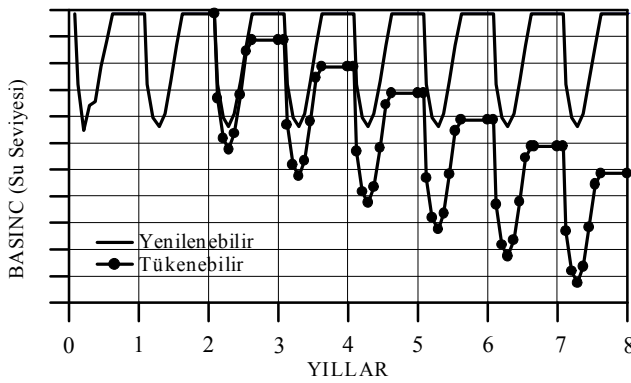
tartışılmaktadır. Uygun modelin seçiminde, eldeki verilerin güvenilirliği, miktarı ve ayrıca modellemenin amacı göz önünde bulundurulur.

2. JEOTERMAL SİSTEMLERİN BASINÇ DAVRANIŞLARI

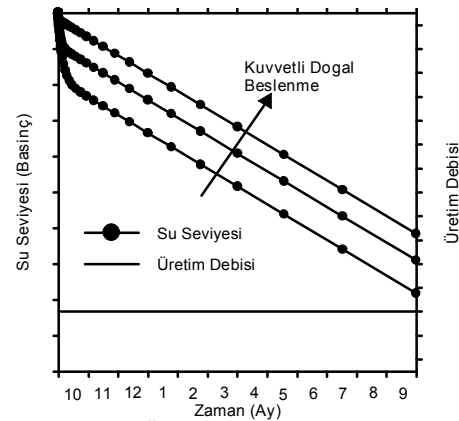
Şekil 1’de, iki farklı jeotermal sistemin yıllar içinde basınç (veya su seviyesi) değişimi gösterilmektedir. Rezervuarın bir işletme dönemi içinde (örneğin, üretim ve kapama dönemini içeren bir yıllık dönemde), üretime son verildiğinde rezervuar basıncı ilk basınca (üretim öncesi basınca) ulaşıyorsa yani üretilen akışkan hacmi doğal beslenme ile karşılanabiliyorsa, bu jeotermal sistem ‘Yenilenebilir Jeotermal Sistem’; rezervuar basıncı ilk basınca ulaşamıyorsa (yani doğal beslenme yetersiz) ve yıllar içinde düşüm gösteriyorsa ‘Tükenebilir Jeotermal Sistem’ olarak adlandırılmaktadır.

Kullanım alanlarına göre jeotermal sistemlerin basınç davranışları doğal beslenmenin ve rezervuardan yapılan üretim/enjeksiyonun etkisiyle farklılıklar göstermektedir. Güç üretimi amaçlı olarak kullanılan jeotermal sistemden yıl boyunca sabit debi ile üretim yapılırken, ısıtma amaçlı olarak kullanılan sistemden yılın soğuk dönemlerinde üretim yapılırken sıcak dönemlerinde üretim durdurulmaktadır.

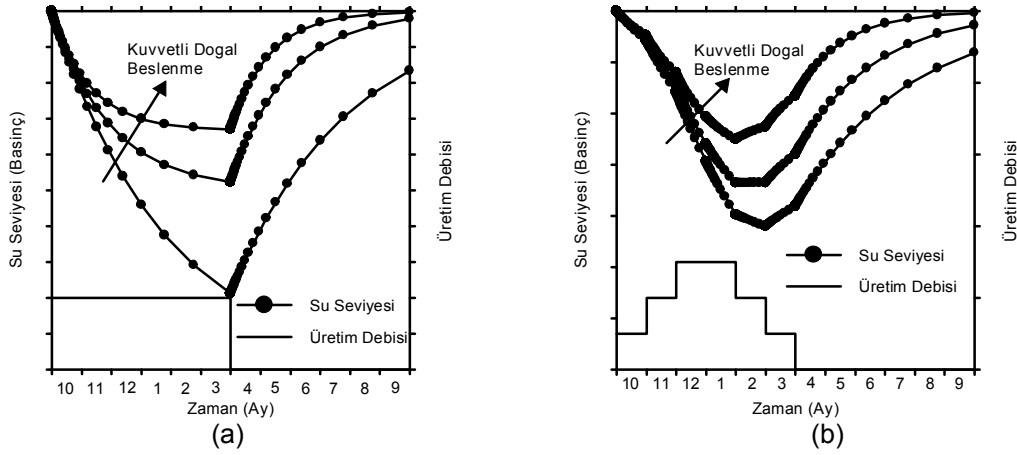
Şekil 2 ve Şekil 3, güç üretimi ve merkezi ısıtma amaçlı olarak kullanılan jeotermal sistemlerin basınç davranışlarını göstermektedir. Güç üretiminde kullanılan sistemlerin basıncı yıl boyunca azalmakta olup, doğal beslenmenin miktarına bağlı olarak basınç düşümü az veya çok olmaktadır (Şekil 2). Jeotermal sistemin ısıtma amaçlı kullanılması durumunda ise ısıtma döneminde sabit debi ile üretim yapıldığı gibi (Şekil 3-a) değişken debi ile de üretim yapılmaktadır (Şekil 3-b). Şekil 3-a ve Şekil 3-b’de gösterilen sistemlerde, üretim döneminde sistemden yapılan üretimin etkisiyle sistemin basıncı düşmekte ve kapama döneminde doğal beslenmenin etkisiyle sistemin basıncı üretimden önceki ilk basınca yükselmekte veya yükselmemektedir. Kapama dönemi sonunda sistemin basıncı üretim döneminin başlangıcındaki basınca ulaşıyorsa bu sistem yenilenebilir bir sistem, ulaşamıyorsa tüketilebilir bir sistem olarak düşünülebilir.



Şekil 1. Yenilenebilir ve Tükenebilir Jeotermal Sistemler.



Şekil 2. Güç Üretimi Amaçlı Kullanılan Jeotermal Sistemin Basınç Davranışı.



Şekil 3. Merkezi Isıtma Amaçlı Kullanılan Jeotermal Sistemin Basınç Davranışı.

3. JEOTERMAL REZERVUARLARIN MODELLENMESİ

Jeotermal rezervuar modellemesinin başlıca amacı, uzun dönem jeotermal rezervuar potansiyelinin doğru ve gerçekçi olarak tahmin edilmesidir. Bu amaçla, özellikle son kırk yıl içinde jeotermal rezervuarların davranışlarını modelleyen birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler, karmaşıklıkları ve maliyetleri açısından farklılık göstermektedirler. Uygun yöntemin (modelin) seçiminde, eldeki verilerin güvenilirliği, miktarı ve ayrıca modellemenin amacı göz önünde bulundurulmalıdır.

Jeotermal sistemler faylar, çatlaklar, faz değişimleri, kimyasal tepkimeler ve ısıl etkilerden dolayı genellikle çok karmaşıktır. Jeotermal sistem modeli geliştirilirken varolan saha verileri dikkatle değerlendirilmeli ve sistemin fiziksel yapısı belirlenmelidir. Bu şekilde kavramsal model oluşturulduktan sonra jeotermal rezervuarın davranışını en uygun temsil edecek model kullanılarak, jeotermal rezervuarın gelecekteki performansı tahmin edilir.

Literatürde jeotermal rezervuar davranışlarını modelleyen çeşitli modeller mevcuttur. Bunlar *üretim debisi azalma yöntemi*, *boyutsuz rezervuar modellemesi yöntemi* ve *3 boyutlu sayısal modelleme yöntemi* olarak üç ana başlık altında toplanabilir.

Üretim debisi azalma analizi yönteminde, kuyuların ve rezervuarın üretim verileri uygun cebirsel denklemlerde kullanılarak, gelecekteki üretim debileri tahmin edilmektedir. Geleceğe yönelik üretim debisinin değişimi ve toplam üretilebilir akışkan miktarı tahminleri bu yaklaşımın amacıdır. Üretim debilerinin tahmininin yapılmasıyla gelecekte sisteme eklenmesi gerekli yeni kuyu sayıları da belirlenebilmektedir. Ancak, yaklaşımın kullanılabilmesi için yeterli üretim verisinin varolması gereklidir. Bu yöntemdeki en önemli sorun saha işletimindeki değişiklikleri (geliştirme sondajları, ek kuyular, enjeksiyon v.b.) göz önünde bulundurmamasıdır.

Boyutsuz rezervuar modellemesinde, rezervuar bir bütün olarak alınır. Rezervuara giren ve rezervuardan çıkanlar gözetilerek ve akışkan/kayaç özellikleri kullanılarak, zamana veya rezervuardan yapılan üretime göre rezervuar basıncı ve sıcaklığının davranışını belirlemeyi amaçlayan bir modelleme şeklidir. Bu yöntemin başlıca avantajları arasında kullanımının basitliği ve büyük bilgisayar kapasitelerine gereksinim duyulmaması sayılabilir. Dezavantajları ise; (1) rezervuardaki akışkan akışını göz önüne almaması ve termodinamik koşulların ve rezervuar özelliklerinin yerel dağılımlarını ihmal etmesi, (2) faz ve ısıl cepheleri modelleyememesi, (3) kuyu aralıkları ve enjeksiyon kuyularının yerleşimleri hakkındaki sorulara yanıt verememesidir.

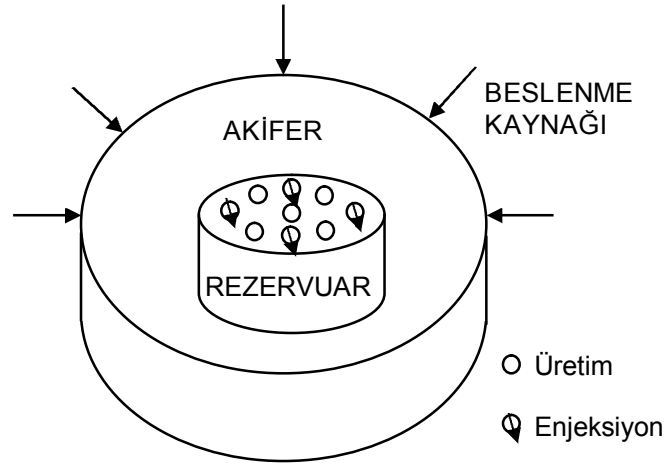
Rezervuarın 3 boyutlu olarak alındığı *sayısal modellerde* rezervuara ait her türlü akışkan ve kuyu özellikleri modele girilmekte, yerel, bölgesel ve rezervuar genelinde geçerli tüm parametrelerin dağılımı göz önüne alınarak rezervuar performansı incelenmektedir. Ancak bu tür modellerin doğruluğu, girilen verilerin doğruluğuyla olduğu kadar çokluğuyla da ilişkilidir. Genellikle bu tür sayısal modelleme çalışmaları, rezervuar ile ilgili verilerin yeterli duruma ulaştığı ve belirli bir üretim ve rezervuar performansı geçmişinin olduğu aşamalarda tercih edilmektedir. Bu yöntemin başlıca avantajı ise tüm matematiksel denklemleri bir bilgisayar kodunda saklaması ve kullanıcıya ne kadar ayrıntılı bir modelleme yapacağına ve hangi fiziksel işlemlerin gerekli olduğuna karar vererek modelleme yapmasına izin vermesidir. En önemli dezavantajları ise akışkan ve rezervuarla ilgili çok sayıda bilginin modelde veri olarak kullanılıyor olması, büyük bilgisayar kapasitelerine ve deneyimli kullanıcılara gerkesinim duyulmasıdır.

3 boyutlu rezervuar modellerinde önemli ölçüde jeolojik, jeofizik, jeokimyasal ve hidrolojik verilere gereksinim duyulması ve gerekli verileri elde etmenin hem fazla zaman alması, hem de maliyetinin yüksek olması sayısal modellemenin olumsuz yönleridir. Yeni bulunan jeotermal sahalar için elde yeterli miktarda veri de bulunmamaktadır. Saha hakkında üretim verisi elde edinildiğinde 3 boyutlu rezervuar modellemesi en uygun ve gerçekçi yaklaşım olacaktır.

Bu çalışmada, boyutsuz rezervuar modellemesi temel olarak incelenecek, modellemede kullanılan yaklaşımlar açıklanacak ve saha uygulamaları tartışılacaktır.

4. BOYUTSUZ REZERVUAR MODELLEMESİ

Bu bölümde sunulan ve kullanılan modellerde, jeotermal sistem üç ayrı bileşen ile temsil edilmektedir. Bunlar; üretim ve enjeksiyonun gerçekleştiği rezervuar, rezervuarı besleyen akifer ve akiferin beslediği beslenme kaynağıdır (Şekil 4).



Şekil 4. Jeotermal Sistemin Bileşenleri.

Modellerde, rezervuar ve akifer birer tank olarak düşünülmemekte ve herbir tank için ortalama özellikler kullanılmaktadır. Akiferin dış sınırının akışa kapalı olması veya sabit basınçlı bir dış sınırdan beslenmesi (bir başka ifade ile jeotermal sistemin beslenmesi) durumu da incelenmektedir.

Daha önce de değinildiği gibi, boyutsuz modelleme çalışmaları rezervuardan yapılan üretim debisinin üretim dönemi boyunca sabit kalması durumunda veya sıcak dönemlerde debinin minimumunda ve soğuk dönemlerde maksimumunda gerçekleştirilmesi durumunda yapılabilir.

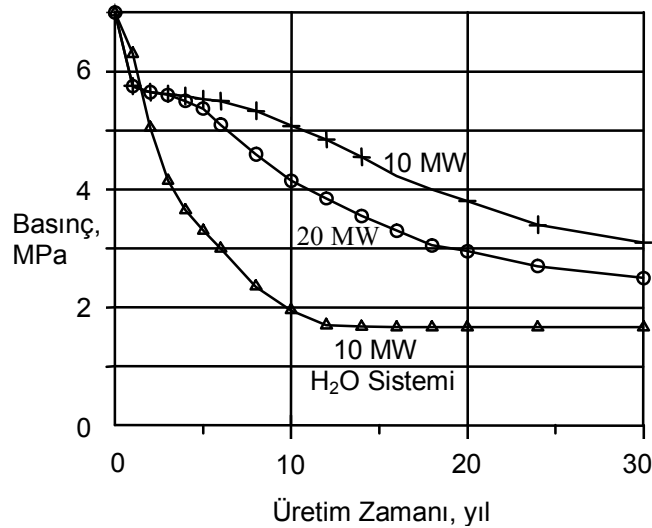
Debinin üretim dönemi boyunca sabit tutulduğu (yıl içinde döngüsel olarak değişmediği) modelleme çalışmasına örnek olarak Kaynak [8]'de verilen boyutsuz modelleme çalışması alınabilir. Şekil 5, elektrik üretimi amacı ile kullanılan Kızıldere jeotermal sahası için modelleme sonuçlarını göstermektedir. Jeotermal sahadan 10 ve 20 MW elektrik üretimi için modelleme çalışması yapılmış, basıncın üretim zamanına göre düşümü tahmin edilmiştir. Başlangıçta tek fazlı olan sistemde basınç hızla düşmekte, kısa bir üretim dönemi sonrasında sistem iki faza dönüştükten sonra basınç düşümü azalmaktadır. Rezervuar koşullarında sıvı su içinde ağırlıkça %1.5 CO₂ içeren rezervuarın üretim-basınç davranışı, CO₂ içermeyen su sisteminin üretim-basınç davranışından (Şekil 5'te 10 MW H₂O Sistemi) oldukça farklıdır.

Şekil 3'de gösterildiği gibi debinin yıl içinde döngüsel olarak değişmesi durumunda aşağıdaki bölümlerde ayrıntılı olarak incelenen modeller kullanılabilir. Modellerde rezervuar ve akiferden oluşan jeotermal sistem, rezervuar bir tank ve akiferler ise ayrı tanklar olarak, modellenerek incelenmektedir.

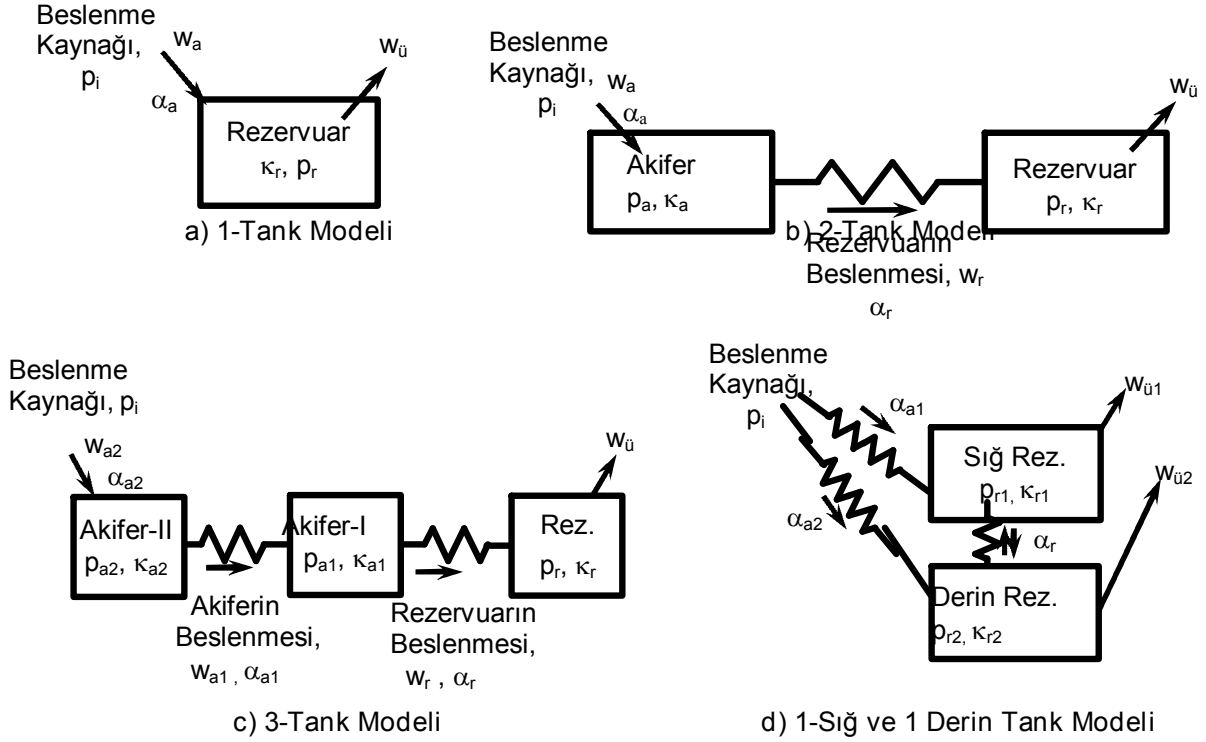
Şekil 6'da gösterilen 4 farklı jeotermal sistem, sadece bilinen basit kütle denge denklemleri kullanılarak modellenebilir. Kullanılan jeotermal sistemler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

1. 1 rezervuar tankı ve beslenme kaynağı (1-Tank Modeli)
2. 1 rezervuar – 1 akifer tankı ve beslenme kaynağı (2-Tank Modeli)
3. 1 rezervuar – 2 akifer tankı ve beslenme kaynağı (3-Tank Modeli)
4. 2 rezervuar tankı ve beslenme kaynağı (1-Sığ ve 1-DerinTank Modeli)

Sıvının etken olduğu jeotermal rezervuarların incelendiği modellerde, üretim süresince izotermal koşullar (sıcaklığın sistem içinde sabit kaldığı ve konuma göre sıcaklık farkının olmadığı) varsayılarak ısı dengesi ihmal edilmektedir.



Şekil 5. Kızıldere Jeotermal Sahasının Rezervuar Performans Tahmini [8]



Şekil 6. Modellemede Kullanılan Tank Sistemleri

Modellerde, tanklar arasındaki (akifer-rezervuar veya akifer-akifer) su girişi Schilthuis kararlı akış denklemi ile ifade edilmektedir. Beslenmenin, tanklar ile beslenme kaynağı arasındaki basınç farkı ile orantılı olduğu varsayılmaktadır.

Kaynak [9, 10, 11]'de ayrıntıları verilen analitik çözümler sabit debi ile üretim yapılması durumu için geçerli olup, değişken debi ile üretim yapılması durumunda ileriki bölümlerde ayrıntılı olarak incelenecek olan Duhamel Kuralı uygulanmaktadır.

Rezervuar basıncının korunması için enjeksiyonun da göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Enjekte edilen akışkanın sıkıştırılabilirliğinin değişmediği varsayımı yapılırsa, enjeksiyon (W_e) ve üretim ($W_{\dot{u}}$) terimleri *Net Üretim* terimi ($W_{\dot{u},net}$) olarak Denklem 1'de verildiği gibi birleştirilebilmektedir.

$$W_{\dot{u},net} = W_{\dot{u}} - W_e \text{ veya kütle debisi olarak } w_{\dot{u},net} = w_{\dot{u}} - w_e \quad (1)$$

İleriki bölümlerde ayrıntılı olarak incelenecek olan optimizasyon tekniği kullanılarak, model sonuçları sahaya ait ölçülmüş basınç verilerine karşılaştırılabilmektedir. Optimizasyon ile en iyi çakışma sağlanarak, rezervuar ve akifer parametreleri tahmin edilebilmektedir [9,12].

a) 1-Tank Modeli : Bu modellemede kullanılan tank sistemi Şekil 6-a ile gösterilmektedir. Burada rezervuar bir tank olarak düşünülmekte, rezervuarı sabit basınçlı bir kaynak (akifer) beslemektedir. Rezervuar tankı ile beslenme kaynağının basınçları başlangıçta ($t = 0$) birbirine eşittir. Rezervuar tankından yapılan net üretim ($w_{\dot{u}}$, kg/sn) miktarına bağlı olarak, basıncı sabit olan akiferden rezervuara su girişi (w_a , kg/sn) gerçekleşmektedir. Sistemden kütle kaybının olmadığı düşünülürse, kütle denge denklemi;

$$W_c = W_i - W_{\ddot{u}} + W_a \quad (2)$$

şeklinde yazılır. Burada; incelenen zaman değerinde rezervuardaki kütle, W_c , rezervuardaki ilk kütle, W_i , üretilen kütle, $W_{\ddot{u}}$, beslenme ile akiferden rezervuara giren kütle, W_a ile gösterilmektedir.

Basıncılı-sıkıştırılmış sistemlerde (confined system) üretim, sıkışmış akışkanın genleşmesi ile gerçekleşmektedir. Sistemin basıncılı-sıkıştırılmış sistem olmasına bağlı olarak, sıvının etken olduğu rezervuarlarda başlangıçta akışkan sıkışmış sudur. Bu durumda rezervuardan üretime başlanması ile birlikte, sıkıştırılabilirliği nedeniyle su genleşecektir. Rezervuar hacmi, V_r , için yerindeki akışkan kütlesi,

$$W_c = V_r \phi_r \rho_r \quad (3)$$

şeklinde verilir. Burada; ϕ_r , rezervuar gözenekliliği ve ρ_r , rezervuar akışkanının yoğunluğudur.

Denklem 2'nin zamana göre türevi alınır ve izotermal sıkıştırılabilirliğin tanımı kullanılırsa;

$$w_a - w_{\ddot{u}} = V_r \phi_r \rho_r c_{tr} \frac{dp_r}{dt} = \kappa_r \frac{dp_r}{dt} \quad (4)$$

elde edilir. Burada; w_a ve $w_{\ddot{u}}$ sırasıyla beslenme ve üretim debileri, c_{tr} toplam (akışkan + kayaç) sıkıştırılabilirliği ve κ_r ise rezervuarın depolama kapasitesi olup $\kappa_r = V_r \phi_r c_{tr} \rho_r$ şeklinde ifade edilmektedir.

Sistemin dış sınırındaki beslenme kaynağının basıncının sabit olması durumunda su girişi (beslenme) debisi Schilthuis modeli kullanılarak [13];

$$w_a = \alpha_a (p_i - p) \quad (5)$$

şeklinde elde edilir. Burada; p_i , beslenme kaynağının basıncı; p , rezervuar tankının basıncı ve α_a , rezervuarın beslenme sabitidir.

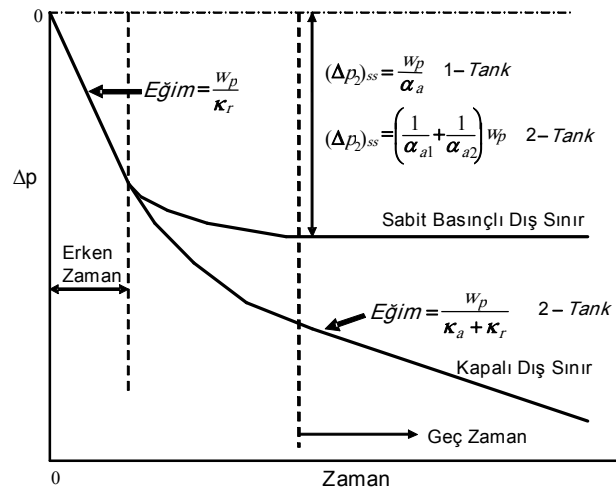
Denklem 4 ve 5 birleştirilir ve elde edilen birinci derece differansiyel denklem uygun başlangıç koşulu kullanılarak çözülürse, rezervuar basıncının (veya $p = \rho g h$ ilişkisinden dolayı kuyuyuçi su seviyesinin) zamana göre ifadesi Denklem 6'daki gibi elde edilir [9,10,11].

$$p_r(t) = p_i - \frac{W_{\ddot{u}}}{\alpha_a} \left[1 - \exp\left(-\alpha_a t / \kappa_r\right) \right] \quad (6)$$

b) 2-Tank Modeli : Şekil 6-b'de gösterilen 2-Tank Modelinde, jeotermal sistemin 3 ana parçadan oluştuğu düşünülmektedir. Üretim ve enjeksiyonun yapıldığı 1 rezervuar tankı, rezervuarı besleyen 1 akifer tankı ve akiferi besleyen sabit basıncılı bir beslenme kaynağı bulunmaktadır. Rezervuar tankından yapılan net üretim ($w_{\ddot{u}}$, kg/sn) miktarına bağlı olarak akifer tankından rezervuar tankına su girişi (w_a , kg/sn) gerçekleşmekte ve akifer tankının basıncı düşmektedir. Böylece tüm sistem, rezervuar tankından yapılan üretimden etkilenmektedir.

Akifer tankının dış sınırında, basıncı p_i değerinde sabit kalan bir beslenme kaynağı nedeniyle, sabit basınçlı bir dış sınır olabileceği gibi akışa kapalı bir dış sınır olması da olasıdır. Akifer tankının uygun dış sınır koşulu kullanılarak modellenme yapılabilmektedir [9,10,11].

2-Tank Modelinin sabit basınçlı dış sınır ve kapalı dış sınır için erken ve geç zaman çözümleri grafiksel olarak Şekil 7’de verilmektedir. Üretim döneminin erken zamanlarında sabit basınçlı dış sınır ve kapalı dış sınır çözümleri birbirleriyle aynı olup; rezervuar basıncı üretim debisi, $w_{ü}$, ve rezervuarın depolama kapasitesine, κ_r , bağlı olarak zamanla doğrusal olarak azalmaktadır. Belirli bir geçiş zamanından sonra, sabit basınçlı dış sınır çözümü geç zamanlarda sabit bir basınç değerine ulaşmakta, bir başka deyişle, rezervuar basıncı zamandan bağımsız olarak sabitlenmektedir. Kapalı dış sınır olması durumunda ise rezervuar basıncı üretim debisi, $w_{ü}$, ve sistemin toplam depolama kapasitelerine, $\kappa_a + \kappa_r$, bağlı olarak zamanla doğrusal olarak azalmaya devam etmektedir.



Şekil 7. 2-Tank Sabit Basınçlı Dış Sınır ve Kapalı Dış Sınır Çözümleri.

c) 3-Tank Modeli : 3-Tank modelinde (Şekil 6-c), jeotermal sistemin beslenmesi 2 akifer tankından oluşmakta ve ayrıca en dıştaki akifer tankı ise sabit basınçlı bir kaynaktan beslenmektedir. Rezervuar tankından yapılan net üretim ($w_{ü}$, kg/sn) miktarına bağlı olarak, I. akifer tankından rezervuar tankına su girişi gerçekleşmekte ve I. akifer tankının basıncının düşmesi nedeniyle II. akifer tankından I. akifer tankına su girişi olmaktadır. II. akifer tankında basınç düştüğünde ise beslenme kaynağından II. akifer tankına su girişi olmaktadır. Bu nedenle, bu sistemi kararsız akışın hidrolojik benzetmesi olarak düşünmek olasıdır.

Bu modellemede, en dıştaki akifer tankının dış sınırından sabit basınçlı bir kaynaktan beslenmesi veya beslenmemesi durumları için analitik çözümler geliştirilmiştir [9,10,11].

d) 1-Sığ ve 1-Derin Tank Modeli : Jeotermal sistemin, 1 sığ ve 1 derin olmak üzere iki ayrı rezervuar tankından oluştuğu ve rezervuar tanklarının sabit basınçlı bir beslenme kaynağından beslendiği düşünülen 1-Sığ ve 1 Derin Tank Modeli Şekil 6-d’de gösterilmektedir. Sığ ve derin rezervuardan yapılan net üretim (sırasıyla, $w_{ü1}$ ve $w_{ü2}$, kg/sn) miktarına bağlı olarak rezervuar tankları arasında da akışkan akışı gerçekleşmektedir. Burada incelenen model, Balçova jeotermal sistemini temsil eden bir model olarak düşünülebilir. Model için analitik çözümler Kaynak [9,10,11]’de verilmektedir.

Kaynak [9, 10, 11]’de ayrıntıları verilen analitik çözümler sabit debi ile üretim yapılması durumu için geçerli olup, değişken debi ile üretim yapılması durumunda Duhamel Kuralı uygulanmaktadır.

Optimizasyon tekniği kullanılarak, model sonuçları sahaya ait ölçülmüş basınç verilerine karşılaştırılabilmektedir. Bu çalışmada, optimizasyon yöntemi olarak Levenberg-Marquardt yöntemi kullanılmaktadır. Optimizasyon ile en iyi çakışma sağlanarak, rezervuar ve akifer parametreleri tahmin edilmektedir [9,12].

5. DUHAMEL İLKESİ VE OPTİMİZASYON YÖNTEMİ

Model sonuçları sabit debide üretim/enjeksiyon durumunda analitik ifadeler şeklinde verilmektedir. Değişken debi ile üretim/enjeksiyon yapılması durumunda Duhamel İlkesi uygulanmaktadır. Rezervuardaki basınç düşümüne Duhamel İlkesi aşağıdaki gibi uygulanmaktadır.

$$\Delta p(t) = \int_0^t w_{\bar{u}}(\tau) \Delta p'_{u'}(t-\tau) d\tau \text{ veya basınç cinsinden, } p(t) = p_i - \int_0^t w_{\bar{u}}(\tau) \Delta p'_{u'}(t-\tau) d\tau \quad (7)$$

Model parametrelerini tahmin edebilmek için Levenberg-Marquardt optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Ölçülen saha verileri model sonuçları ile karşılaştırılarak, rezervuar ve akifer parametreleri belirlenebilmektedir. Bu optimizasyon tekniğinde *Ağırlıklı En Küçük Kareler Yöntemi* kullanılmaktadır. Böylece ölçüm hatalarının etkisi ihmal edilmemektedir.

Bunlara ek olarak optimizasyon sonunda elde edilen model parametrelerinin güvenilirliğini belirlemek amacıyla güvenilirlik aralığı yüzdesi ve modellemede çakışmanın niteliğini belirlemek için RMS (Root Mean Square) tanımları verilmektedir. Düşük yüzdeli güvenilirlik aralığı değeri, elde edilen söz konusu parametre değerinin güvenilir olarak tahmin edildiğini gösterirken, yüksek güvenilirlik aralığı yüzdesi parametre değerinin güvenilirliğini azaltmaktadır. RMS değeri, gözlemlenen ile modelden elde edilen verilerin farklarının karelerinin toplamının veri noktasına bölümünün kareköküdür

$$\left(RMS = \sqrt{\frac{(y_{gözlem} - y_{model})^2}{N}} \right). \text{ RMS değeri küçüldükçe model ile saha verisi daha iyi çakışma}$$

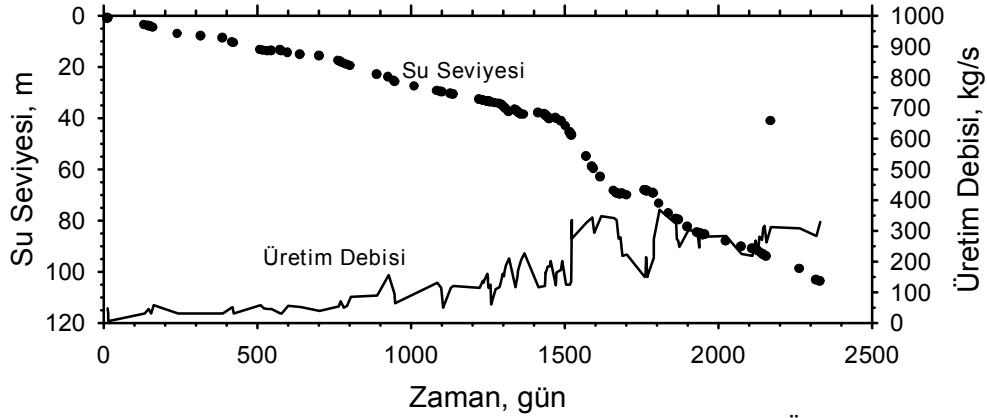
gösterirken, RMS değeri büyüdükçe daha kötü bir çakışma göstermektedir.

6. SAHA UYGULAMALARI

Bu bölümde, Türkiye'de Kızıldere jeotermal sahası ile literatürden elde edilen İzlanda'daki üç sahanın ve Yeni Zelanda'daki bir sahanın verileri kullanılarak, yukarıda ayrıntıları verilen modellerden 1-, 2- ve 3- tank modellerinin saha verileri ile gösterdiği uyum tartışılmaktadır. Ayrıca literatürde Türkiye dışındaki dört saha verilerini kullanarak sayısal modelleme çalışması yapmış olan Axelsson'un [1] sonuçları ve Sanyal'ın [14] sonuçları ile model sonuçları karşılaştırılmaktadır.

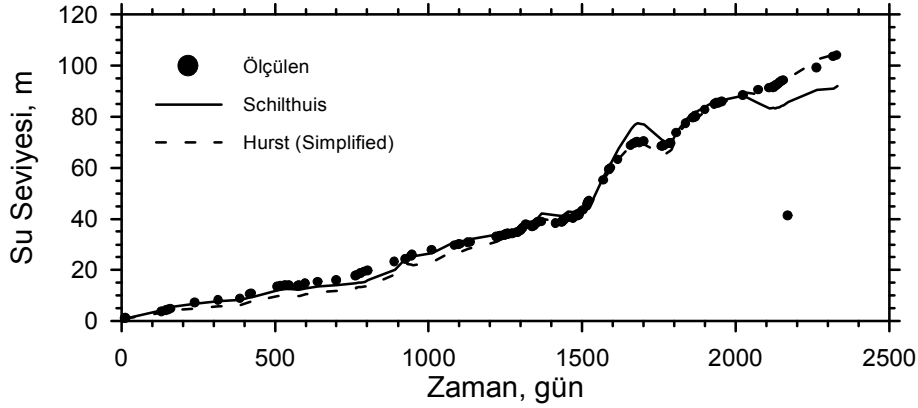
6.1 Svartsengi Jeotermal Sahası

İzlanda'da bulunan Svartsengi jeotermal sahası akışkan sıcaklığı yaklaşık 235°C olan sıvının etken olduğu bir jeotermal sahadır. Yaklaşık 7 yıllık üretim ve su seviyesi verileri literatürde bulunmaktadır (Şekil 8).



Şekil 8 . Svartsengi Jeotermal Sahasının Su Seviyesi Değişimi ve Üretim Verileri [6]

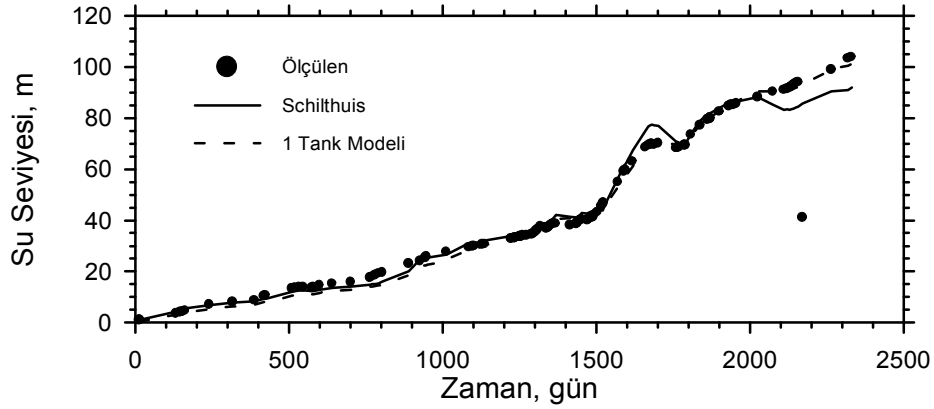
Literatürde Olsen [6] Svartsengi sahasının verilerini ve su girişi modellerini kullanarak, jeotermal rezervuarın değerlendirilmesi konusunda modelleme çalışmaları yapmışlardır. Olsen'in kullandığı modeller içinde, Schilthuis kararlı akış modeli saha verileri ile kabul edilebilir bir çakışma ve Hurst Simplified karasız akış modeli ise en iyi çakışmayı göstermiştir (Şekil 9). Schilthuis kararlı akış modeli kullanılarak yapılan modellemede saha verileri ile model sonuçları erken dönemlerde geç dönemlere göre daha uyumlu sonuçlar vermektedir. Olsen Schilthuis kararlı akış modelini kullanarak rezervuara ait depolama kapasitesi ve beslenme sabitini $\kappa_r = 6.408 \times 10^8$ kg/bar ve $\alpha_a = 36.53$ kg/bar-sn olarak elde etmiştir. Sonsuz çevrel akifer varsayımı ile Hurst (simplified) modeli saha verileri ile çok iyi bir uyum göstermektedir.



Şekil 9. Schilthuis Kararlı Akış ve Hurst (Simplified) Karasız Akış Modeli Sonuçları [6]

1-Tank Modelinin sonucu, Schilthuis modeli ve saha verileri ile karşılaştırmalı olarak Şekil 10'da sunulmaktadır. 1-Tank modeli saha verileri ile Schilthuis modeline göre daha iyi bir çakışma göstermektedir.

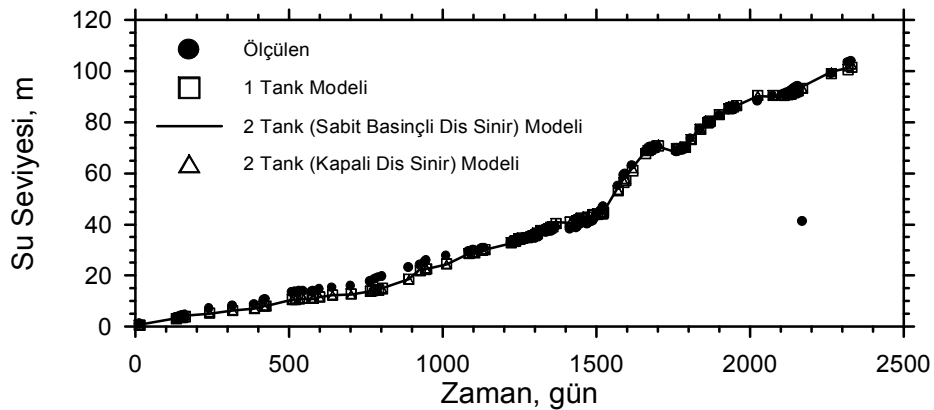
Svartsengi jeotermal sahası üretim ve su seviyesi verileri 1-tank ve 2-tank (sabit basınçlı ve kapalı dış sınır) modeli kullanılarak modellenerek elde edilen en iyi çakışmanın sonuçları Tablo 1 ve Şekil 11'de verilmektedir. Tablo 1'de parantez içinde verilen yüzdeler, güvenilirlik aralığını göstermektedir. 2-Tank (sabit basınçlı dış sınır) modeli kullanılarak elde edilen rezervuar ve akifer parametrelerine ait güvenilirlik aralıkları (özellikle κ_r ve α_r için elde edilen güvenilirlik aralıkları), Tablo 1'den de görüldüğü gibi 1-tank ve 2-tank (kapalı dış sınır) modelleri kullanılarak elde edilen değerlerden oldukça büyüktür. Bu sonuç, 2-tank (kapalı dış sınır) modelinin bu saha verilerini modellemek için daha uygun olduğunu belirtmektedir.



Şekil 10. 1-Tank Modeli ile Schilthuis Kararlı Akış Modelinin Karşılaştırması [12]

Tablo 1 . Svartsengi Sahası Optimizasyon Sonuçları

	Olsen Schilthuis	1-Tank	2-Tank (Sabit Basıncılı Dış Sınır)	2-Tank (Kapalı Dış Sınır)
κ_a (kg/bar)	--	--	6.9×10^8 (38%)	1.0×10^{10} (69%)
κ_r (kg/bar)	6.408×10^8	1.02×10^9 (6%)	6.1×10^8 (63%)	9.1×10^8 (10%)
α_a (kg/bar-sn)	--	--	28.3 (27%)	--
α_r (kg/bar-sn)	36.53	24.6 (3%)	144 (150%)	30.2 (16%)
RMS, bar		0.504	0.507	0.504



Şekil 11. 1-Tank ve 2-Tank Modelinin Karşılaştırması [12]

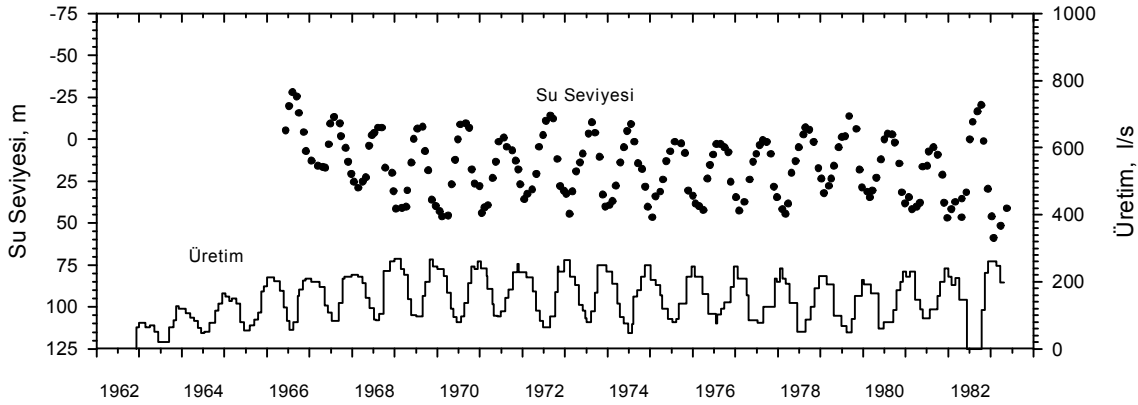
1-Tank ve 2-tank (kapalı dış sınır) modelleri ölçülen saha verileri ile tatmin edici bir uyum göstermektedir (Şekil 11 ve Tablo 1'deki RMS değerleri). 1-Tank ve 2-tank (kapalı dış sınır) modellerinden elde edilen optimizasyon sonuçları birbirlerine çok yakın sonuçlar vermişlerdir. Bu nedenle, hangi modelin bu saha verileri ile daha iyi bir uyum gösterdiğini belirleyebilmek için daha fazla bilgi ve ayrıntılı analizler gerekmektedir.

6.2 Laugarnes Jeotermal Sahası

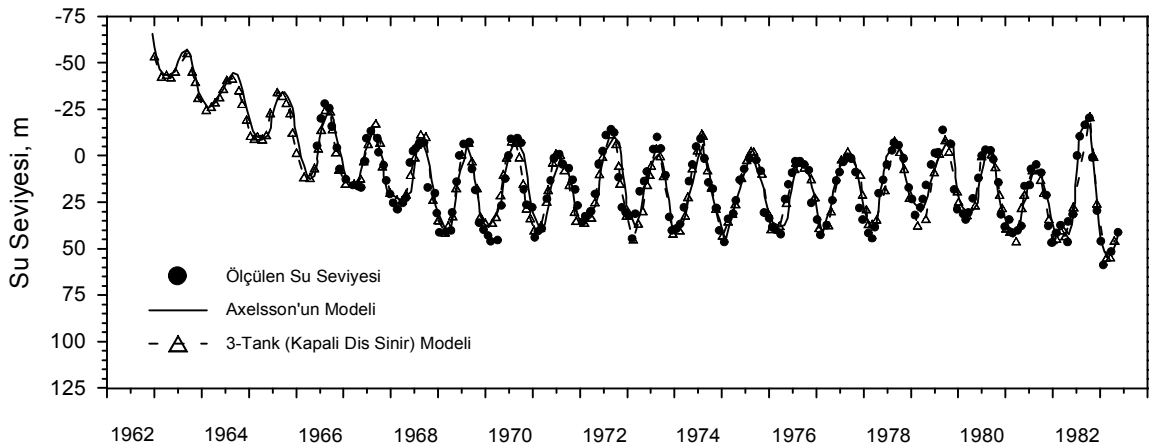
Güney-Batı İzlanda'da bulunan Laugarnes sahası, sızının etken olduğu bir jeotermal saha olup sıcaklığı 115-135°C arasındadır. Sahadan yapılan toplam üretim ile sahayı temsil etmek üzere seçilen bir kuyuda yapılan su seviyesi ölçümleri Şekil 12'de gösterilmektedir.

Şekil 13'de Axelsson tarafından yapılan modellemenin sonuçları ile bu çalışmada geliştirilen 3-tank (kapalı dış sınır) modelinin sonuçları karşılaştırılmaktadır. Görüldüğü gibi, 3-tank modeli ile Axelsson'un modeli hem birbirleri ile hem de saha verileri ile oldukça iyi bir uyum göstermektedirler.

1-tank, 2-tank (sabit basınçlı dış sınır) ve 3-tank (kapalı dış sınır) modellerinin sonuçları ise Tablo 2 ve Şekil 14'de gösterilmektedir. Şekil 14'den de anlaşılacağı gibi 1-tank modeli saha verileri ile kabul edilebilir bir çakışma göstermemiştir. 2-tank (sabit basınçlı dış sınır) ve 3-tank (kapalı dış sınır) modelleri saha verileri ile uyum içindedir. Bu nedenle, 2-tank (sabit basınçlı dış sınır) ve 3-tank (kapalı dış sınır) modelleri ile Laugarnes sahasının temsil edilebileceği söylenebilmektedir.



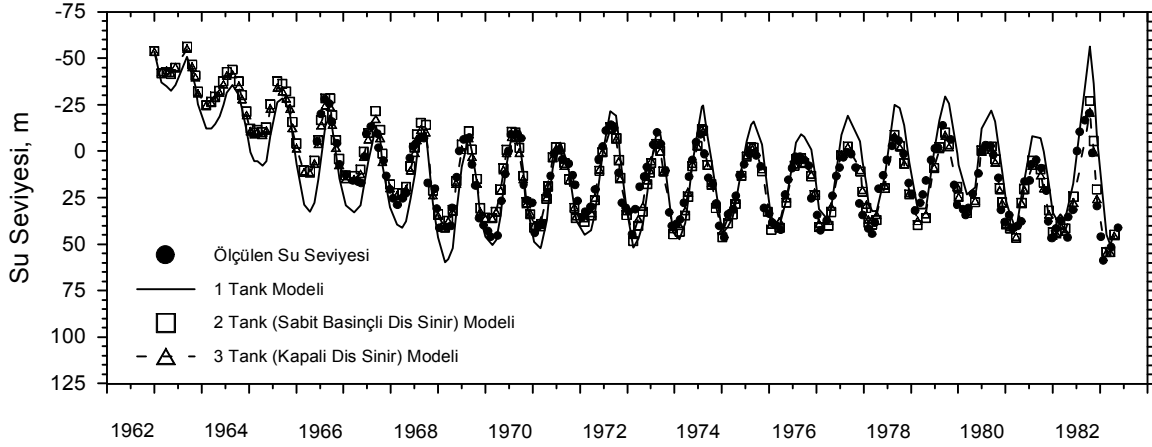
Şekil 12. Laugarnes Sahasının Su Seviyesi Değişimi ve Üretim Verileri [12].



Şekil 13. Axelsson'un Modeli ile 3-Tank (Kapalı Dış Sınır) Modelin Karşılaştırması [12].

Tablo 2. Laugarnes Sahası Optimizasyon Sonuçları.

	1-Tank	2-Tank (Sabit Basıncılı Dış Sınır)	3-Tank (Kapalı Dış Sınır)	Axelsson
α_a , kg/bar-sn (= α_{a1} , 3-Tank)	-	36.06 (%12)	74.7 (%21)	61.8
α_r , kg/bar-sn	20.05 (%3)	29.84 (%6)	33.5 (%9)	36.8
κ_{a1} , kg/bar	-	-	$2.47 \cdot 10^9$ (%107)	$2.09 \cdot 10^9$
κ_{a2} , kg/bar (= κ_a , 2-Tank)	-	$1.03 \cdot 10^{10}$ (%25)	$3.03 \cdot 10^{10}$ (%14)	$3.64 \cdot 10^{10}$
κ_r , kg/bar	$9.8 \cdot 10^7$ (%15)	$8.8 \cdot 10^7$ (%13)	$7.94 \cdot 10^7$ (%20)	$7.73 \cdot 10^7$
RMS	1.24	0.615	0.581	

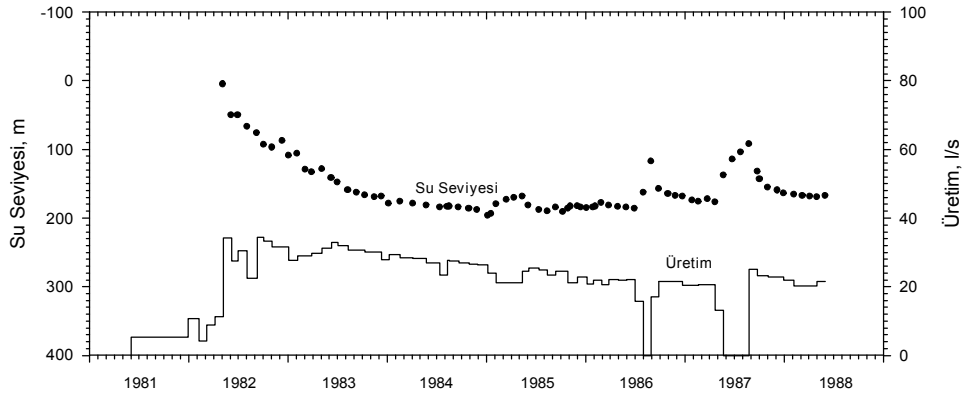


Şekil 14. 1-, 2- ve 3- Tank Modellerinin Karşılaştırması [12].

6.3 Glerardalur Jeotermal Sahası

Sıvının etken olduğu bir jeotermal saha olup sıcaklığı yaklaşık 61°C'dir. Sahadan yapılan toplam üretim ile sahayı temsil etmek üzere seçilen bir kuyuda yapılan su seviyesi ölçümleri Şekil 15'de verilmektedir. Şekil 15'de gösterilen su seviyesi ölçümleri, görel olarak sabit sayılabilecek bir debide üretim yapan sahanın dış sınırından sabit basınçlı bir kaynaktan beslendiğini işaret etmektedir (Bkz. Şekil 7). Rezervuar basıncının zamanın erken dönemlerinde azaldıktan sonra zamanın geç dönemlerinde sabitlenmesi rezervuarın sabit basınçlı bir kaynaktan beslendiğini gösteren en önemli kanıttır.

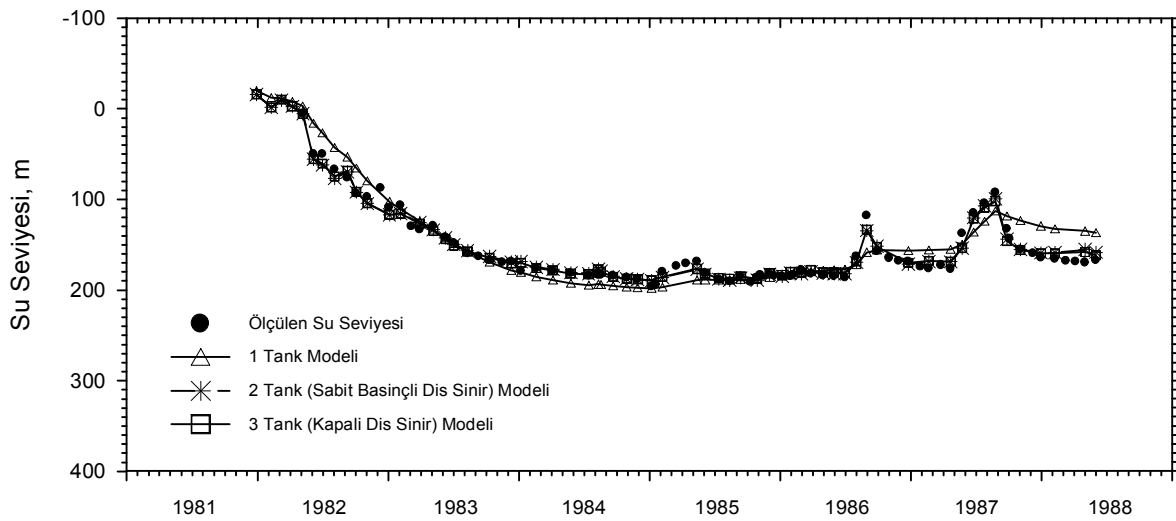
Tablo 3 ve Şekil 16'da 1-tank, 2-tank (sabit basınçlı dış sınır) ve 3-tank (kapalı dış sınır) modelin sonuçları karşılaştırma yapmak üzere verilmektedir. Bu saha için, beklenildiği gibi, 2-tank (sabit basınçlı dış sınır) ve 3-tank (kapalı dış sınır) modelin sonuçları saha verileri ile uyum göstermektedir.



Şekil 15. Glerardalur Sahası Su Seviyesi ve Üretim Verileri [12].

Tablo 3. Glerardalur Sahası Optimizasyon Sonuçları.

	1-Tank	2-Tank (Sabit Basıncılı Dış Sınır)	3-Tank (Kapalı Dış Sınır)	Axelsson
α_a , kg/bar-sn (= α_{a1} , 3-Tank)	-	1.42 (%5)	1.5 (%11)	1.89
α_r , kg/bar-sn	1.09 (%3)	3.41 (%15)	3.75 (%21)	3.37
κ_{a1} , kg/bar	-	-	$1.4 \cdot 10^9$ (%109)	$6.08 \cdot 10^8$
κ_{a2} , kg/bar (= κ_a , 2-Tank)	-	$8.07 \cdot 10^7$ (%12)	$6.9 \cdot 10^7$ (%23)	$6.66 \cdot 10^7$
κ_r , kg/bar	$4.05 \cdot 10^7$ (%9)	$8.17 \cdot 10^6$ (%29)	$7.6 \cdot 10^6$ (%36)	$5.9 \cdot 10^6$
RMS	1.612	0.61	0.6	



Şekil 16. 1-, 2- ve 3- Tank Modellerinin Karşılaştırması [12].

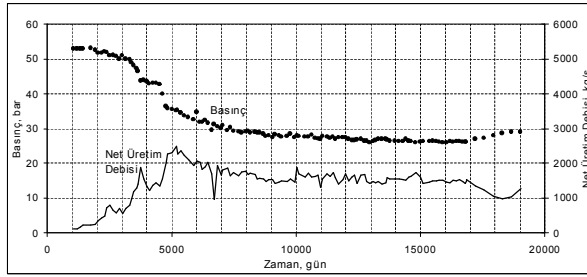
6.4 Wairakei Jeotermal Sahası

Yeni Zelanda'nın kuzey adasının merkezinde bulunan Wairakei sahası, sıvının etken olduğu bir jeotermal sistemdir. Rezervuar sıcaklığı yaklaşık 260°C olup, 1953 yılından beri elektrik üretimi amacıyla işletilmektedir. Maksimum elektrik üretimi kapasitesi 192 MWe olan tesisin ortalama elektrik üretimi 157 MWe'dir.

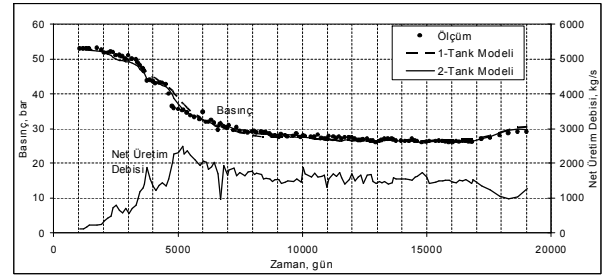
Sahadan yapılan toplam üretim ile sahayı temsil etmek üzere seçilen bir kuyuda yapılan basınç ölçümleri Şekil 17'de gösterilmektedir [14, 15, 16].

1-tank ve 2-tank modellerinin sonuçları Tablo 4 ve Şekil 18'de gösterilmektedir. Şekil 18'den de anlaşılacağı gibi 1-tank ve 2-tank modelleri saha verileri ile kabul edilebilir bir çakışma göstermiştir. Bunun yanısıra, Tablo 4'teki RMS değerleri incelenecek olursa, 2-tank modeli 1-tank modeline göre saha verileri ile daha iyi bir uyum içindedir. Ancak diğer taraftan Tablo 4'te parantez içinde verilen güvenilirlik aralıklarına göre ise rezervuara ait model parametrelerinin 1-tank modeli ile daha güvenilir olarak belirlendiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle, 1-tank modeli ile Wairakei sahasının temsil edilebileceği söylenebilmektedir.

Tablo 4'te ayrıca karşılaştırma yapmak amacıyla literatürde bu sahayı modellemiş olan Sanyal'ın [14] elde ettiği model parametreleri de verilmektedir. Görüldüğü gibi Sanyal'ın model parametreleri ile 1-Tank modelinden elde edilen model parametreleri uyum içerisindedir.



Şekil 17. Wairakei Sahasının Basınç Değişimi ve Net Üretim Verileri ^{14,15,16}



Şekil 18. 1- ve 2- Tank Modellerinin Karşılaştırması

Tablo 4. Wairakei Sahası Optimizasyon Sonuçları.

	α_a , kg/bar-s	α_r , kg/bar-s	κ_a , kg/bar	κ_r , kg/bar	RMS, bar
1-Tank	-	57.37 (±0.65)	-	1.54×10^{10} (± 5.16×10^8)	1.007
Sanyal'ın Modeli[14]	-	48.61	-	1.1×10^{10}	-
2-Tank	69.61 (±7.37)	277.29 (±122.65)	1.90×10^{10} (± 2.11×10^9)	4.28×10^9 (± 2.90×10^9)	0.752

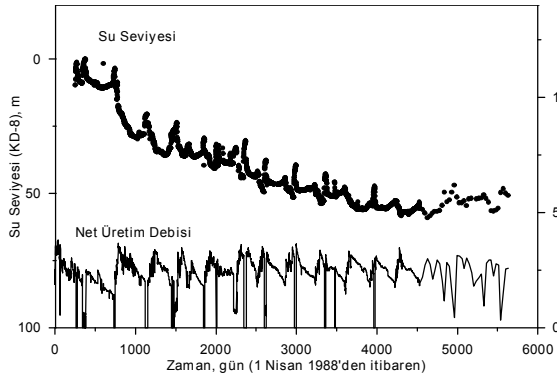
6.5 Kızıldere Jeotermal Sahası

Büyük Menderes Grabeninin doğusunda, Gediz ve Çukursu grabenlerinin kesiştiği bölgede yer alan Kızıldere jeotermal sahası, sınının etken olduğu bir jeotermal sistemdir. Jeotermal akışkan 4500 ppm tuzluluğa sahip olup, kütleli olarak %1-3 çözünmüş CO_2 içermektedir. Rezervuar sıcaklığı yaklaşık 195-240°C arasında ve rezervuar derinliği ise 300 m ile 2300 m arasındadır.

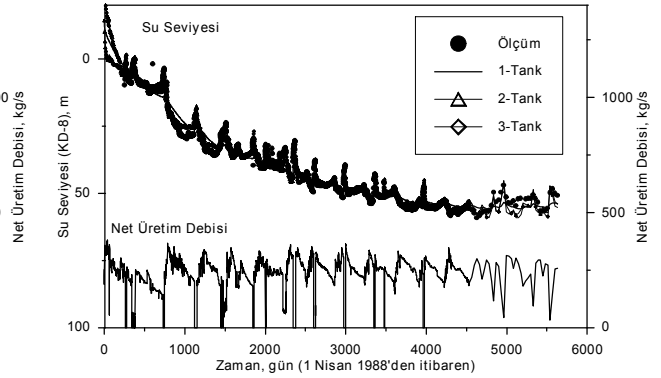
1968 yılında keşfedilen sahada 1970 yılının ortalarına kadar sahayı geliştirmek amacıyla 17 kuyu delinmiştir. Sahadan 6 üretim kuyusu (KD-6, 7, 13, 14, 15, 16) ile 1984 yılında elektrik üretimine başlanmıştır. İki yıl sonra daha fazla buhar üretmek amacıyla 3 üretim kuyusu (KD-20, 21, 22) daha delinmiştir. 17.8 MWe kurulu güce sahip elektrik santralinden halen 7.5 MWe elektrik enerjisi üretilmektedir. 1997 yılında tekrar-basma yapmak amacıyla 2300 m'ye bir derin kuyu (R-1) delinmiş olup, bu kuyudan 240°C'de akışkan üretilmiştir. Bu nedenle, tekrar-basma bir başka kuyudan (R-2) yapılmaktadır.

Sahada başlıca iki farklı rezervuardan üretim yapıldığı belirlenmiştir [17]: (1) 600 m ile 800 m arasında kireçtaşlarından oluşan sığ rezervuar (195-200°C), (2) 1400 m ile 1500 m arasında mermerlerden oluşan derin rezervuar (200-240°C).

1 Nisan 1988'den itibaren sahadan yapılan toplam üretim ile KD-8 kuyusunda yapılan basınç ölçümleri Şekil 19'da, 1-, 2- ve 3-tank modellerinin sonuçları grafiksel olarak Şekil 20'de ve elde edilen model parametreleri Tablo 5'te gösterilmektedir.



Şekil 19. Kızıldere Sahasının Seviye Değişimi ve Net Üretim Verileri



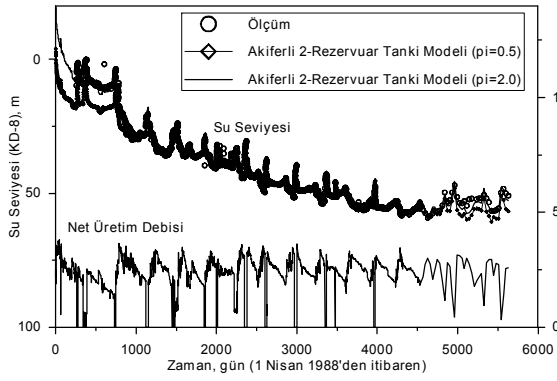
Şekil 20. 1-, 2- ve 3- Tank Modellerinin Karşılaştırması

Tablo 5. Kızıldere Sahası 1-, 2- ve 3-Tank Modeli Optimizasyon Sonuçları.

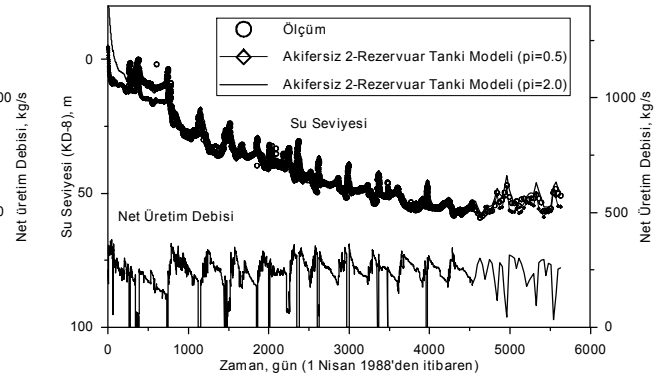
	α_{a2} , kg/bar-s (= α_a , 2-Tank)	α_{a1} , kg/bar-s	α_r , kg/bar-s	κ_{a2} , kg/bar (= κ_a , 2-Tank)	κ_{a1} , kg/bar	κ_r , kg/bar	RMS bar
1-Tank	-	-	41.22 (± 0.14)	-	-	4.3×10^9 ($\pm 3.5 \times 10^7$)	1.54
2-Tank	45.38 (± 0.213)	-	315.1 (± 9.93)	5.77×10^9 ($\pm 7.7 \times 10^7$)	-	2.15×10^8 ($\pm 1.6 \times 10^7$)	1.52
3-Tank	56.62 (± 0.736)	180.4 (± 9.56)	339.1 (± 16.28)	1.1×10^{10} ($\pm 1.65 \times 10^9$)	1.69×10^9 ($\pm 1.49 \times 10^8$)	1.1×10^8 ($\pm 1.43 \times 10^7$)	1.52

Şekil 20'den de anlaşılacağı gibi 1-tank modeli seviyedeki değişimin genel eğilimini yansıtmakta olmasına rağmen saha verileri ile çok iyi bir çakışma göstermemektedir. Bunun yanı sıra, 2- ve 3-tank modelleri saha verileri ile oldukça iyi bir uyum içindedir. Tablo 5'te verilen model parametrelerine ait güvenilirlik aralıkları ve RMS değerleri incelendiğinde de sahanın basınç davranışının 2- ve 3-tank modelleri ile daha iyi temsil edildiği söylenebilmektedir.

Bir sonraki aşama olarak akiferli ve akifersiz 2-rezervuar tankı modelleri kullanılmaktadır. KD-8 kuyusu seviye ölçümleri sığ rezervuarı temsil ederken, derin rezervuarı temsil edecek seviye ölçümleri olmadığı için sadece sığ rezervuara çakıştırma yapılmaktadır. Derin rezervuardan yapılan net üretim debisi olarak R-1 derin kuyusunun üretim verileri ve sığ rezervuarın net üretim debisi olarak ise R-1 üretimi dışındaki toplam üretim debisi kullanılmaktadır. Akiferli ve akifersiz 2-rezervuar tankı modellerinin sonuçları grafiksel olarak Şekil 21 ve 22'de ve elde edilen model parametreleri Tablo 6'da sunulmaktadır.



Şekil 21. Akiferli 2-Rezervuar Tankı Modeli



Şekil 22. Akifersiz 2-Rezervuar Tankı Modeli

Tablo 6. Kızıldere Sahası Akiferli ve Akifersiz 2-Rezervuar Tankı Modelleri Optimizasyon Sonuçları.

	2-Rezervuar Tankı Modeli	
	Akiferli	Akifersiz
α_{r1} , kg/bar-s	46.2 (± 75.67)	0.0105 (± 65.1)
α_{r2} , kg/bar-s	100.0 (± 109.8)	49.3 (± 87.7)
α_{r12} , kg/bar-s	328.2 (± 76.79)	277.9 (± 65.86)
α_a , kg/bar-s	55.93 (± 1.152)	-
κ_{r1} , kg/bar	1.17×10^8 ($\pm 1.32 \times 10^7$)	2.29×10^8 ($\pm 1.43 \times 10^7$)
κ_{r2} , kg/bar	1.42×10^9 ($\pm 6.45 \times 10^8$)	7.57×10^9 ($\pm 3.54 \times 10^9$)
κ_a , kg/bar	1.14×10^{10} ($\pm 6.09 \times 10^8$)	-
RMS sığ, bar	1.495	1.499
RMS derin, bar	-	-

Tablo 6'da parantez içinde verilen güvenilirlik aralıkları ve RMS değerleri incelendiğinde, her iki modele ait RMS değerlerinin arasında önemli bir fark bulunmamasına rağmen akifersiz modeldeki sığ rezervuarın beslenme sabitinin (α_{r1}) güvenilirlik aralığının çok yüksek olduğu gözlenmektedir. Bu

nedenle saha verilerini en iyi temsil eden modelin akiferli 2-rezervuar tankı modeli olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

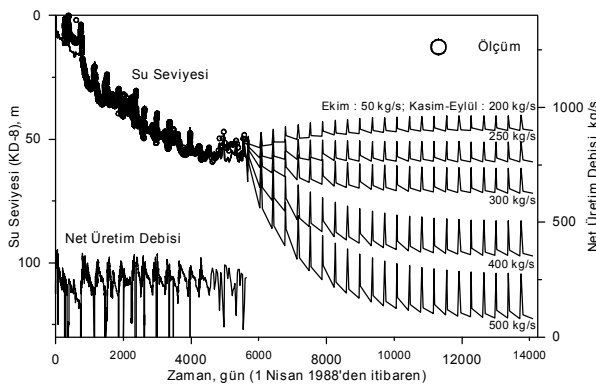
Kızıldere Jeotermal Sahasının Gelecek Performans Tahmini: Bu bölümde, KD-8 kuyusu su seviyesi verileri kullanılarak 2-tank ve akiferli 2-rezervuar tankı modelleri ile çeşitli üretim/tekrar-basma senaryoları için Kızıldere jeotermal sahasının gelecek 20 yıl için performans tahminleri yapılmaktadır.

Çevre sorunlarını minimuma indirmek ve santralin bakımını sağlamak amacıyla Ekim ayında sahadan yapılan üretim minimumda tutulmaktadır. Bu nedenle, 2-tank modeli ile yapılan performans tahmininde kullanılan üretim senaryolarında Ekim ayında sahadan yapılan üretim 50 kg/s olarak sabit tutulmaktadır. 5 farklı üretim senaryosunda sahadan 20 yıl süresince her ay 200, 250, 300, 400 ve 500 kg/s sabit debi ile net üretim yapıldığı öngörülmektedir.

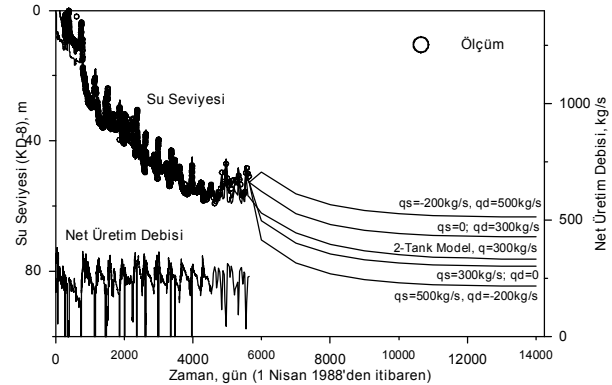
Şekil 23, 2-tank modeli kullanılarak elde edilen performans tahminlerini göstermektedir. Sonuç olarak; sahadan yapılan aylık net üretimin 250 kg/s'den 500 kg/s'ye artırılması durumunda, KD-8 kuyusundaki su seviyesinin şimdiki değerinin 65 m aşağısında olacağı tahmin edilebilmektedir (Şekil 23).

Sığ ve derin rezervuarlar için ayrı ayrı üretim ve tekrar-basma senaryoları kullanılarak akiferli 2-rezervuar tankı modeli ile gelecek 20 yıl için performans tahminleri yapılmaktadır. Sahadan yapılan toplam net üretim 300 kg/s'de sabit tutularak, (1) sığ rezervuara 200 kg/s sabit debi ile tekrar-basma ve derin rezervuardan 500 kg/s sabit debi ile üretim yapılması, (2) sadece derin rezervuardan 300 kg/s sabit debi ile üretim yapılması ve sığ rezervuardan üretim ve tekrar-basmanın yapılmaması, (3) sığ rezervuardan 100 kg/s ve derin rezervuardan 200 kg/s sabit debi ile üretim yapılması ve sahada tekrar-basmanın yapılmaması, (4) sadece sığ rezervuardan 300 kg/s sabit debi ile üretim yapılması ve derin rezervuardan üretim ve tekrar-basmanın yapılmaması, (5) sığ rezervuardan 400 kg/s sabit debi ile üretim ve derin rezervuara 100 kg/s sabit debi ile tekrar-basma yapılması, (6) sığ rezervuardan 500 kg/s sabit debi ile üretim ve derin rezervuara 200 kg/s sabit debi ile tekrar-basma yapılması durumları incelenmektedir.

Elde edilen performans tahminleri Şekil 24'te sunulmaktadır. Şekil 24'teki eksi (-) işareti tekrar-basma durumunu yansıtmaktadır. Ayrıca karşılaştırma yapmak amacıyla sahadan 300 kg/s sabit debi ile net üretim yapılması durumu için 2-tank modeli ile elde edilen performans tahmini Şekil 24'te sunulmaktadır. Sahadan yapılan net üretim kullanılan 6 senaryoda da aynı olmasına karşın sığ ve derin rezervuarlardan yapılan üretim ve tekrar-basmanın çeşitlilik göstermesi durumunda kuyularda oluşan seviye değişimi farklı olmaktadır. Derin rezervuarın üretim ve sığ rezervuarın tekrar-basma amaçlı olarak kullanılması durumunda sahadaki basınç düşümü (bir başka deyişle seviye düşümü) daha az olmaktadır (Şekil 24).



Şekil 23. 2-Tank Modeli Performans Tahmini



Şekil 24. Akiferli 2-Rezervuar Tankı Modeli Performans Tahmini

SONUÇLAR

Bu çalışmada; jeotermal rezervuarların basınç davranışını (veya kuyuyu su seviyesi değişimlerini) modellemek üzere kütle denge denklemleri kullanılarak elde edilen modeller tartışılmaktadır. Modellerden, optimizasyon tekniği kullanılarak, rezervuar ve akifer parametreleri tahmin edilebilmektedir.

Tank modelleri kullanılarak bu çalışmada incelenen 5 ayrı sahanın su seviyesi (basınç) verileri modellenmektedir. Tüm sahalanın model sonuçları ile saha verileri oldukça uyumlu çakışma göstermekte ve bu çalışmada söz edilen modellerin geçerliliğini göstermektedir.

Tüm sahalalar için olduğu gibi, Kızıldere jeotermal sahasının modellenmesi ve geleceğe yönelik performans tahminlerinin yapılması sahanın işletiminde son derece önemlidir. Kızıldere sahanın modelleme çalışmasında görüldüğü gibi sahada sıg rezervuarın tekrar-basma ve derin rezervuarın ise üretim amaçlı olarak kullanılması sahanın verimli olarak kullanılması için gereklidir.

Modelleme çalışmasında kullanılan uzun süreli ve sürekli olarak yapılan ölçümler model sonuçlarının belirsizliğini azaltmakta olup, sahanın gelecek performansının belirlenmesinde hayati bir değer taşımaktadır. Yine tüm sahalalar için olduğu gibi, Kızıldere jeotermal sahası için yeni verilerin ölçülmesi durumunda modellemenin tekrarlanması sahanın gelecek performansını daha doğru belirleyebilmek için uygun olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] AXELSSON, G.; "Simulation of Pressure Response Data From Geothermal Reservoirs by Lumped Parameter Models," 14th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, USA, 257-263, 1989.
- [2] AXELSSON, G., GUNNLAUGSSON, E.; Long-term Monitoring of High-and Low-Enthalpy Fields Under Exploitation, International Geothermal Association-International Institute for Geothermal Research, Auckland, New Zealand, 2000.
- [3] BRIGHAM, W.E., RAMEY, H.J.Jr.; "Material and Energy Balance in Geothermal Reservoirs," Reservoir Engineering Assessment of Geothermal Systems, Ramey, H.J.Jr. (editor), Petroleum Engineering Department, Stanford University, 1981.
- [4] CASTANIER, L.M., SANYAL, S.K., BRIGHAM, W.E.; "A Practical Analytical Model for Geothermal Reservoir Simulation," SPE Cal. Regional Meeting, Los Angeles, Ca, April 9-11, SPE 8887, 1980.
- [5] GRANT, M.A.; "Approximate Calculations Based on a Simple One Phase Model of a Geothermal Reservoir," New Zealand Journal of Science, Vol. 20, 19, 1977.
- [6] OLSEN, G.; Depletion Modeling of Liquid Dominated Geothermal Reservoirs, Technical Report SGP-TR-80, Stanford Geothermal Program, Stanford University, USA, 1984.
- [7] WHITING, R.L., RAMEY, H.J.Jr.; "Application of Material and Energy Balances to Geothermal Steam Production," Journal of Petroleum Technology (July), 893-900, 1969.
- [8] ALKAN, H., SATMAN, A.; "A New Lumped Parameter Model For Geothermal Reservoirs in the Presence of Carbon Dioxide," Geothermics, Vol. 19, No. 5, 469-479, 1990.
- [9] SARAK, H.; "Lumped Parameter Reservoir Models for Low-Temperature Geothermal Reservoirs", Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü, Temmuz 2004.
- [10] SARAK, H., ONUR, M., SATMAN, A.; "Jeotermal Rezervuarlarda Beslenmenin Önemi", UTES'2002 (IV. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu), Bildiri Kitabı, 629-637, İstanbul, 16-18 Ekim, 2002.
- [11] SARAK, H., ONUR, M., SATMAN, A.; "New Lumped Parameter Models for Simulation of Low-Temperature Geothermal Reservoirs," 28th Stanford Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, USA, 27-29 Jan, 2003.

- [12] SARAK, H, ONUR, M., SATMAN, A.; "Applications of Lumped Parameter Models for Simulation of Low-Temperature Geothermal Reservoirs," 28th Stanford Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, USA, 27-29 Jan, 2003.
- [13] SCHILTHUIS, R.J.; "Active Oil and Reservoir Energy," Trans. AIME, 118, 33-52, 1936.
- [14] SANYAL, S. K., "Sustainability and Renewability of Geothermal Power Capacity", World Geothermal Congress 2005, Antalya, 24-29 Nisan 2005.
- [15] CLOTWORTHY, A. W., "Wairakei Reservoir Engineering", 20th New Zealand Geothermal Workshop 1998, Auckland, New Zealand, 21-27.
- [16] O'SULLIVAN, M. J., BULLIVANT, D. P., MANNINGTON, W. I., FOLLOWS, S. E., "Modeling of the Wairakei-Tauhara Geothermal System", 20th New Zealand Geothermal Workshop 1998, Auckland, New Zealand, 59-66.
- [17] SATMAN, A., SARAK, H., ONUR, M., KORKMAZ, E.D., "Modeling of Production/Reinjection Behavior of the Kizildere Geothermal Field by a Two-Layer Geothermal Reservoir Lumped Parameter Model", World Geothermal Congress 2005, Antalya, 24-29 Nisan 2005.

ÖZGEÇMİŞLER

Abdurrahman SATMAN

İstanbul Teknik Üniversitesi Petrol Mühendisliği Bölümü'nden Y. Mühendis olarak mezun olduktan sonra gittiği A.B.D.'deki Stanford Üniversitesi'nde Petrol Mühendisliği Bölümü'nden MS ve Doktora ünvanlarını aldı. Daha sonra Stanford Üniversitesi'nde Assistant Profesör olarak çalıştıktan sonra 1980 yılında İTÜ Petrol Mühendisliği Bölümü'nde çalışmaya başladı. 1985-1987 arasında Suudi Arabistan'da KFUPM-Research Institute'te çalıştı. Halen İTÜ Petrol Mühendisliği Bölümü'nde görev yapmaktadır. İlgili alanları arasında petrol, doğal gaz ve jeotermal mühendisliği ve üretim ve rezervuarla ilgili konular yer almaktadır.

Mustafa ONUR

İstanbul Teknik Üniversitesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü'nde profesör olarak görev yapmaktadır. İlgili alanları arasında kuyu testleri, rezervuar karakterizasyonu, rezervuar modelleme ve doğrusal-olmayan parametre tahmini konuları yer almaktadır. Suudi Arabistan'da King Saud Üniversitesi petrol mühendisliği bölümünde öğretim üyesi olarak ve University of Tulsa'da yine petrol mühendisliği bölümünde ziyaretçi profesör olarak çalıştı. ODTÜ'den lisans ve University of Tulsa'dan MS ve doktora ünvanlarını aldı.

Hülya SARAK

İstanbul Teknik Üniversitesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü'nden 1993 yılında lisans ve 1997 yılında yüksek lisans ve 2004 yılında doktora ünvanlarını aldı. 1997-1998 yılları arasında Yeni Zelanda'da Auckland Üniversitesi tarafından düzenlenen "Jeotermal Enerji Teknolojisi Diploma Kursu"na katıldı. 1995 yılında araştırma görevlisi olarak göreve başladığı İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü'nde halen Dr. Araştırma Görevlisi olarak görev almaktadır.